Aus dem Institut für Medizinische Physik und Biophysik
der Georg-August-Universität zu Göttingen
Direktor: Professor Dr. E. Witte

Über Messungen von Dosis-build-up-Faktoren für Strahlenschutzzwecke

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Heinrich Georg Ebert
aus
Dortmund/Westfalen

Göttingen 1960

Aus dem Institut für Medizinische Physik und Biophysik
der Georg-August-Universität zu Göttingen
Direktor: Professor Dr. E. Witte

Über Messungen von Dosis-build-up-Faktoren für Strahlenschutzzwecke

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Georg-August-Universität zu Göttingen

vorgelegt von
Heinrich Georg Ebert
aus
Dortmund/Westfalen

Göttingen 1960

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

0/61

D 7

Referent: Professor Dr. R. Hilsch

Korreferent: Professor Dr. E. Witte

Tag der mündlichen Prüfung: 20. Juli 1960

Inhaltsübersicht.

A. Aufgabenstellung.

a. Die Materialkonstanten μ und B.

b. Einige bisher übliche Methoden zur Festlegung der Schutzwirkung eines Absorbers, die zu Fehlinterpretationen führen können.

B. Die Messung von B_∞ an Materialstücken geringer Größe.

a. Beschreibung der Meßanordnung.

b. Messungen über die Auswirkungen verschiedener geometrischer Parameter der Anordnung auf die Größe des Dosis-build-up-Faktors.

1. Der Einfluß der Feldgröße.
2. Der Einfluß des Abstandes Strahlungsmeßgerät - Strahlenquelle.
3. Der Einfluß des Abstandes Strahlungsmeßgerät - Absorber

c. Die Mängel der beschriebenen Methode.

C. Die Messung des Dosis-build-up-Faktors B_∞ mit großer Genauigkeit ohne Benutzung des Schwächungskoeffizienten μ.

a. Beschreibung der Meßanordnung.

b. Untersuchungen über die Brauchbarkeit der Methode für Strahlenschutzmaterialien verschiedener Ordnungszahlen.

1. Absorber hoher Ordnungszahl.
2. Absorber mittlerer Ordnungszahl.
3. Absorber niedriger Ordnungszahl.

D. a. Die Berechnung des Dosisleistungsspektrums aus dem registrierten Impulsratenspektrum.

b. Gesichtspunkte zur Auswahl eines geeigneten Meßinstrumentes.

E. Zusammenstellung der erzielten Meßergebnisse.

F. Zusammenfassung.

G. Literaturverzeichnis.

A. Aufgabenstellung.

Bei der Herstellung von Strahlenschutzräumen für wissenschaftliche, technische oder medizinische Zwecke ist die Problemstellung im allgemeinen die, einen Raum A (Abb. 1) durch eine Schutzwand W so gegen einen Röntgen- oder γ -Strahler S im Raum B abzuschirmen, daß Personen in A keine zu großen Strahlendosen erhalten.

Die Aufgabe des Physikers ist hierbei die Bestimmung der Dosisleistung für verschiedene Punkte im Raum A, wenn Strahlungsleistung, Strahlenqualität und räumliche Orientierung des Strahlers S im Raum B bekannt sind.

Die Überprüfung einer fertigen Anlage solcher Art bereitet heute keine besonderen Schwierigkeiten mehr. Umstritten sind dagegen die Methoden, welche zur Beurteilung der Schutzwirkung einer Wand bestimmter Dicke durch Messungen an relativ kleinen Stücken des in Aussicht genommenen Materials führen. Ferner ist die Konvention über die Angabe zweckmäßiger Materialkonstanten zur zahlenmäßigen Charakterisierung des Absorbers uneinheitlich und oft unglücklich.

Besonders bei Verwendung sehr energiereicher Röntgen- und γ -Strahlungen ist die Vorausbestimmung der Schutzwirkung von praktischer Bedeutung, da eine Überdimensionierung der Wandstärke - wie man sie bei langwelligeren Strahlen, z.B. in der Röntgendiagnostik, zur Sicherung eines ausreichenden Strahlenschutzes meist vorsieht - bei diesen äußerst durchdringenden Strahlungen sehr kostspielig werden kann. Ebenso würde eine nachträgliche Verstärkung der Schutzwand unnötige Mehrkosten und evtl. auch räumliche Schwierigkeiten mit sich bringen.

a. Die Materialkonstanten μ und B.

Zur Berechnung der erforderlichen Stärke einer Schutzwand W verwendet man zweckmäßig zwei Materialkonstanten und zwar den Schwächungskoeffizienten μ und den Dosis-build-up-Faktor B. Die Definition des μ

darf als bekannt vorausgesetzt werden. Zum Begriff des Dosis-build-up-Faktors B (13, 14, 15), wie er in der vorliegenden Arbeit verwendet werden soll, sind jedoch einige kurze Erklärungen notwendig.

Ist S ein punktförmiger Strahler, B eine Blende, die dafür sorgt, daß nur ein sehr enges Strahlenbündel die Wand W (Abb. 2) trifft, so ist von den genannten beiden Materialkonstanten μ und B nur der Schwächungskoeffizient μ von Bedeutung für die Dosisleistung D_0, welche ein Meßinstrument in P erhält. Die Vorausberechnung einer Wandstärke, durch die eine bestimmte Schwächung der Strahlung bewirkt wird, kann nach den geläufigen Verfahren erfolgen, wenn μ für die betreffende Quantenenergie und den speziellen Absorber bekannt ist.

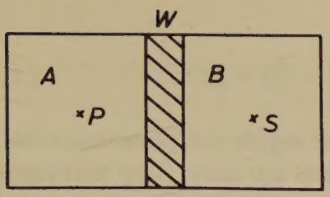
Unter den Bedingungen, wie sie beim Strahlenschutz vorkommen, wird jedoch die Schutzwand im allgemeinen nicht von einem engen Bündel, sondern auf einem mehr oder weniger ausgedehnten Feld oder auch in ihrer ganzen Fläche getroffen. Die Folge ist, daß in P (Abb. 3) nicht nur die durch W geschwächte Primärstrahlung, sondern zusätzlich Streustrahlen aus der ganzen Wand wirksam werden. P erhält daher unter sonst gleichen Umständen eine Dosisleistung D, welche größer ist als die Dosisleistung D_0 im engen Bündel. Hierbei kann D ein beträchtliches Vielfaches von D_0 sein.

Die Zahl, welche angibt, um wievielmal D größer als D_0 ist, bezeichnet man als den Dosis-build-up-Faktor B. Es gilt mithin für die tatsächliche Dosisleistung

$$D = B \cdot D_0 \quad . \tag{1}$$

Der Dosis-build-up-Faktor ist also definiert als der Quotient aus der Dosisleistung D hinter einer ausgedehnten, von einem weitgeöffneten Strahlenbündel getroffenen Schutzwand und der Dosisleistung D_0 unter sonst gleichen Bedingungen, aber bei engem Strahlenbündel.

Sind D_0 und B bekannt, so kann nach der Gleichung (1) die Dosisleistung D hinter einem Absorber der Dicke x berechnet werden. D_0 selbst kann auch unter Anwendung des Exponentialgesetzes aus dem Schwächungskoeffizienten μ und der Dosisleistung D_0^0 in P ohne Absorber zwischen dem Strahler S und dem Punkte P bestimmt werden:



Beispiel für ein Abschirmproblem. Der Raum A mit einer Person oder einem Meßgerät im Punkte P ist getrennt durch eine Strahlenschutzwand W vom Strahler S im Raum B.

Abb. 1

Ein Punkt P wird von einem engen Strahlenbündel getroffen, das durch einen Absorber W geschwächt wurde. Zur Berechnung des Strahlenschutzes ist nur die Schwächungskonstante μ des speziellen Materials erforderlich.
(S = Strahler, B = Blende).

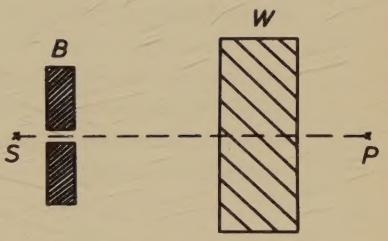


Abb. 2

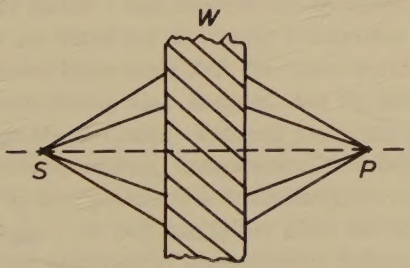
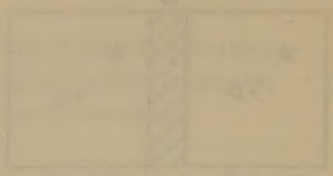
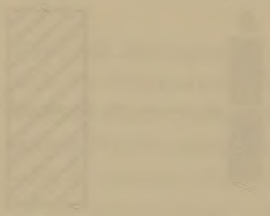


Abb. 3

Ein Punkt P wird von der aus einer Wand W austretenden Strahlung getroffen. Diese setzt sich zusammen aus der durch W geschwächten Primärstrahlung und der von W ausgehenden Streustrahlung. Zur Berechnung der Dosisleistung in P sind die Schwächungskonstante μ und der Dosis-build-up-Faktor B erforderlich.
(S = Strahler).





$$(2) \qquad D_o = D_o^o \cdot e^{-\mu \cdot x} .$$

Gleichbedeutend mit obiger Definition des B ist die folgende, welche dann angewandt wird, wenn die Dosisleistung aus der Zahl der γ - Quanten N (E) der Energie E bis E + Δ E pro Flächen und Zeiteinheit, dem Absorptionskoeffizienten μ_a^{Luft} (E) für Luft und ihrer Dichte ϱ^{Luft} nach der Gleichung

$$(3) \qquad D = \int_{E_1}^{E_{max}} \mu_a^{Luft}(E) \cdot N(E) \cdot E \cdot \varrho^{Luft\ -1} \cdot dE$$

berechnet wird:

$$(4) \qquad B = \frac{\int \mu_a^{Luft}(E) \cdot N(E) \cdot E \cdot dE}{\int \mu_a^{Luft}(E) \cdot N_o(E) \cdot E \cdot dE}$$

Dabei bedeuten N_o (E) die Zahl der ungestreuten Quanten, E_1 die untere Grenzenergie der Strahlung und E_{max} ihre Maximalenergie.

B ist stets größer oder gleich 1 und erreicht ein Maximum, wenn der Öffnungswinkel des von der Wand auf den Punkt P fallenden Strahlenbündels 180^o beträgt. Für diesen besonderen Fall des Dosis-build-up-Faktors wird im folgenden die Bezeichnung B_∞ benutzt. Nur für dieses B_∞ lassen sich allgemeingültige Werte finden, während die Größe von B sonst von der jeweiligen Versuchsanordnung, insbesondere dem Öffnungswinkel des Bündels, abhängt. Für den praktischen Strahlenschutz interessiert in erster Linie dieses B_∞ , da sich mit seiner Hilfe die Maximaldosen errechnen lassen, welche hinter einer ausgedehnten Schutzwand wirksam werden können.

Die in der Literatur angegebenen, theoretisch ermittelten build-up-Faktoren haben eine andere Bedeutung als die oben beschriebene Größe B_∞ (3, 5, 16, 21, 22, 23, 24, 25, 41, 46, 47, 48). Sie berücksichtigen zusätzlich die Rückstreuung aus dem Absorber, welcher in diesem Fall den Punkt P umgibt. Sie gelten entweder für einen punktförmigen Strahler

und einen Punkt P, welche beide innerhalb eines unendlich ausgedehnten Mediums liegen, oder für parallelen Strahleneinfall, allerdings dann unter Annahme eines halbseitig unendlich ausgedehnten Mediums. Beide Werte unterscheiden sich nur geringfügig um etwa 5 % in dem in dieser Arbeit untersuchten Bereich und sind dadurch innerhalb ihrer Fehlergrenzen von etwa $\pm$ 10 bis 20 % als gleich anzusehen (1, 22). Im folgenden werden sie deshalb nicht weiter unterschieden und gemeinsam mit B^* bezeichnet. Sofern Zahlenwerte angegeben werden, sind die für einen punktförmigen Strahler berechneten Werte der Literatur (22) entnommen worden.

Die Berechnung des B^* erfolgte nach der Theorie der γ -Strahlenabsorption und konnte durch einige später vorgenommene Messungen (6, 10, 12, 17, 51, 54, 55) bestätigt werden. Die Meßergebnisse sind aber durch die Ungenauigkeit des verwendeten Schwächungskoeffizienten recht unsicher. Es hat sich erwiesen, daß der Fehler des μ auch die Möglichkeiten eines Vergleichs zwischen Theorie und Messung einschränkt (22, 24).

Selbstverständlich lassen sich build-up-Faktoren auch auf andere Größen, welche eine Strahlung kennzeichnen, beziehen (22) ; das ist z.B. der Fall beim Energie-build-up-Faktor. In der vorliegenden Arbeit wird der Dosis-build-up-Faktor benutzt, weil das im Hinblick auf das Ziel der Untersuchungen am zweckmäßigsten erschien; denn es handelt sich ja vorwiegend um den Strahlenschutz, auf biologischem und medizinischem Gebiet, bei dem die Strahlenbelastung durch die Dosis ausgedrückt wird (27, 30).

Aus Angaben von Berger (2, 3, 4, 42) kann entnommen werden, daß beim Übergang von einem unendlichen, den gesamten Raum erfüllenden Medium zu einem unendlichen, aber in der Schichtdicke x begrenzten Absorber sich ein kleinerer build-up-Faktor ergibt. Damit erhält man für die drei Formen des Dosis-build-up-Faktors die Beziehung

(5) $$B \leq B_{\infty} \leq B^* \quad .$$

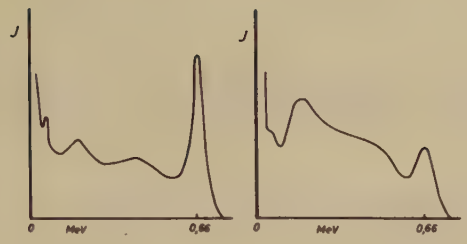


Abb. 4

Impulsratenspektren von Cs^{137}-Strahlung nach Durchgang durch 21 mm Pb (links) bzw. 115 mm Barytbeton +) der Dichte 3, 8 (rechts) bei großem bestrahlten Feld. Gleiche Dosisleistung bei beiden Spektren.

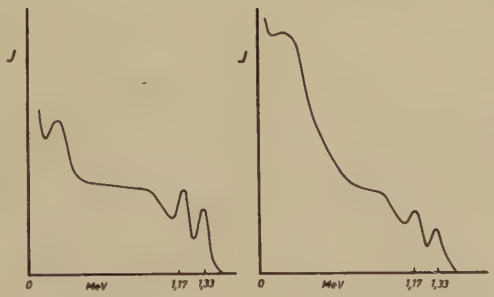


Abb. 5

Impulsratenspektren von Co^{60}-Strahlung nach Durchgang durch 29 mm Pb (links) bzw. 115 mm Barytbeton der Dichte 3, 8 (rechts) bei großem bestrahlten Feld. Gleiche Dosisleistung bei beiden Spektren.

+) Strahlenschutzbauelemente der Firma Vereinigte Werke Dr. Rudolf Alberti und Co., Bad Lauterberg/Harz

b. Einige bisher übliche Methoden zur Festlegung der Schutzwirkung eines Absorbers, die zu Fehlinterpretationen führen können.

Im Rahmen der Messungen für den praktischen Strahlenschutz wurden build-up-Faktoren direkt oder indirekt - z.B. durch Angabe von Bleigleichwerten (19, 20, 37, 40) bei großem bestrahlten Feld - schon früher gemessen (26). Alle diese Methoden haben jedoch den Nachteil, daß sie recht umständlich und häufig nicht hinreichend genau sind. Zwischen B, B_∞ und B^* wird nicht unterschieden und dementsprechend bei den Messungen die geschilderte Differenz nicht berücksichtigt. Ferner wird bei der Messung des Schwächungskoeffizienten μ , der zur Berechnung des build-up-Faktors notwendig ist, mit Querschnitten des Strahlenbündels gearbeitet, welche zur Registrierung undefinierter Mengen von Streustrahlen führen müssen und dadurch differierende Werte für μ ergeben(7, 20, 26, 27, 28, 33, 35, 40, 45, 52, 53). Dieser Fehler ist sehr folgenschwer, da er exponentiell in den errechneten Wert für D_0 eingeht und dadurch auch B entsprechende Fehler aufweist. - Es werden dann von manchen Autoren Meßanordnungen vorgeschlagen und Geräte benutzt, gegen deren Zuverlässigkeit Bedenken bestehen (13, 14, 20, 32, 49) oder zu weitgehende Vereinfachungen vorgenommen (44).

Gerade auf dem biologisch-medizinischen Sektor des Strahlenschutzes besteht die Konvention, daß zur Charakterisierung eines Absorbers nicht die spezifischen Materialkonstanten μ und B_∞ sondern Bleigleichwerte angegeben werden (19, 20, 37, 40). Dieser Wert soll festlegen, welche Bleischicht einer bestimmten Dicke des betreffenden Stoffes hinsichtlich seiner Schutzwirkung gegen γ -Strahlung entspricht. Die Schutzwirkung wird dabei nur selten durch Vergleich zweier Dosisleistungen ermittelt, sondern aus dem Impulszahlen eines Zählrohres oder Szintillationszählers bestimmt, ohne die starke Energieabhängigkeit der Empfindlichkeit dieser Instrumente zu berücksichtigen. Abb. 4 und 5 zeigen vier Spektren, welche bei gleicher Dosisleistung hinter einer ausgedehnten Bleiabschirmung und hinter einer Barytmauer mit einem Szintillationszähler gemessen wurden. Als Strahler wurde Cs^{137} bzw. Co^{60} verwendet. Es ist ersichtlich, daß der Prozentsatz der Streustrahlung vom Material des Absorbers abhängt. Eigene Untersuchungen ergaben, daß - wie zu erwarten - der Bleigleichwert eines Materials keine zur Bleidicke proportionale Größe ist, wie häufig angenommen wird. Diese a priori Voraussetzung und die Extrapolation

auf größere Schichtdicken von Bleigleichwerten, welche an sehr dünnen Schichten bestimmmt wurden, sind nicht zulässig, insbesondere, da die Dosisleistung exponentiell von der Schichtdicke abhängt. Abb. 6 zeigt die Meßergebnisse.

Eindeutige Zahlenwerte zur Charakterisierung eines Strahlenschutzstoffes ergeben sich nur durch Angabe des Schwächungskoeffizienten μ und des Dosis-build-up-Faktors B_∞ in Abhängigkeit von der Quantenenergie der Strahlung, vom speziellen Absorbermaterial und von der Schichtdicke.

B. Die Messung von B_∞ an Materialstücken geringer Größe.

a. Beschreibung der Meßanordnung.

Wenn an einem relativ kleinen Stück eines Absorbers das B_∞ bestimmt werden soll, so kann jeweils unmittelbar nur der B - Wert für eine endliche Flächengröße gemessen werden. Es ist die Frage, um wieviel Prozent dieser gemessene Wert gesetzmäßig von dem gesuchten B_∞ abweicht, oder ob gegebenenfalls durch eine geeignete Meßvorrichtung ein B - Wert unmittelbar meßbar ist, der sich nicht nennenswert von dem gesuchten B_∞ unterscheidet.

Eine Messung des Dosis-build-up-Faktors kann wie folgt vorgenommen werden:

a. Man bestimmt μ durch Messung im engen Bündel mit einer Anordnung nach Abb. 7 in bekannter Weise, indem man die Dosisleistungen D_0^0 ohne und D_0 mit Absorber mißt und nach Gleichung

$$(2) \qquad D_0 = D_0^0 e^{-\mu \cdot x}$$

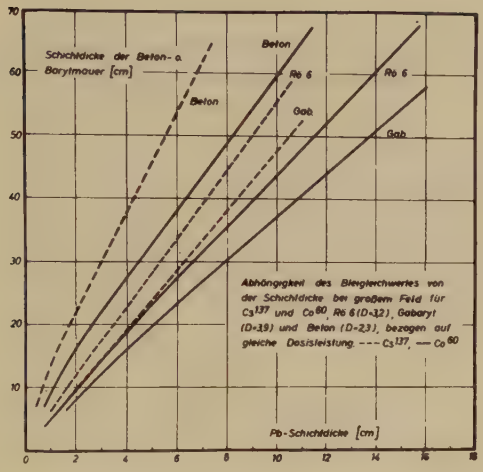


Abb. 6

Abhängigkeit des Bleigleichwertes von der Schichtdicke für verschiedene Materialien und Strahlungen. Werte für Beton nach (43) berechnet.

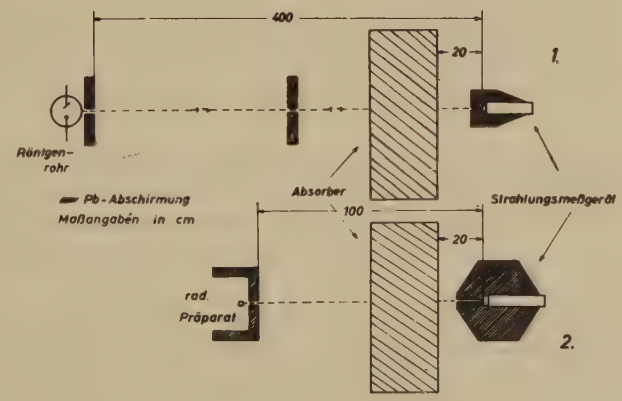


Abb. 7

Meßanordnung zur Bestimmung der Dosisleistung bei kleinem Felddurchmesser und zur Berechnung der Schwächungskonstanten μ für Röntgen- und γ - Strahlung (1 und 2). Felddurchmesser von 0,4 - 5 mm.

den Wert von μ errechnet. Mit Hilfe des so ermittelten μ kann die Dosisleistung D_o hinter einem Absorber beliebiger Dicke x berechnet werden.

b. Man nimmt eine Messung der Dosisleistungen D mit Absorber und D^o ohne Absorber vor, jedoch bei weitgeöffnetem Strahlenbündel und mit einem Meßgerät, das die in P durch Streu- und Primärstrahlung hervorgerufene Dosisleistung registriert (Abb. 8). Dadurch erhält man die Dosisleistung D und kann in Abhängigkeit von der Wandstärke x den Dosis-build-up-Faktor nach

(1) $$B = D / D_o$$

berechnen.

Die Dosisleistungen D_o^o und D^o müssen jeweils mitgemessen werden, da für die Messungen im engen und weiten Strahlenbündel etwas andere geometrische Bedingungen vorliegen, wie Abb. 7 und 8 zeigen, und man deshalb zweckmäßig D_o und D in Prozenten von D_o^o bzw. D^o angibt.

Als Strahlungsmeßgerät wird ein NaJ(Tl) - Kristall der Größe 3,8 cm Ø x 2,5 cm in Verbindung mit einem Impulshöhenanalysator (Abb. 9) verwendet. Aus der vom Gerät registrierten spektralen Energieverteilung der Strahlung kann auf ihre Dosisleistung geschlossen werden.

Die Einblendung des Strahlenbündels und die Abschirmung der Meßgeräte erfolgt durch Bleischichten von 4 bis 10 cm Dicke. Dadurch ist der Nulleffekt stets klein gegenüber den Meßwerten; er wird - soweit erforderlich - bei der Auswertung selbstverständlich berücksichtigt.

Um die Möglichkeit auszuschließen, daß die Bleiabschirmung des Meßgerätes Fehler durch zusätzliche Rückstreuung erzeugen könne, wurde sie zur Kontrolle entfernt; dies führte jedoch zu keiner Änderung der Meßergebnisse. In weiteren Kontrollversuchen wurde die Bleiabschirmung innen mit einer 5 mm starken Al - Schicht ausgekleidet, welche die Bleieigenstrahlung erheblich schwächen mußte. Auch hierbei ergab sich keine Änderung der Meßergebnisse, so daß offenbar eine nennenswerte Rückstreuung oder

Eigenstrahlung der Bleiabschirmung nicht vorhanden war. - Schließlich konnte auch bei einer Messung der spektralen Energieverteilung keine Einwirkung der Abschirmung beobachtet werden (Abb. 21 rechtes Bild).

Es war nun zu prüfen, inwieweit sich die gemessenen Dosis-build-up-Faktoren B vom gesuchten B_∞ unterscheiden. Dazu wurden die folgenden Messungen vorgenommen.

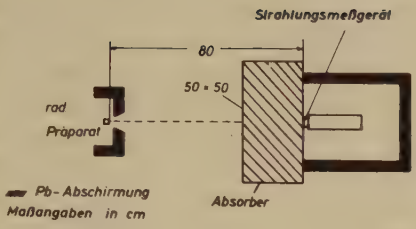
b. Messungen über die Auswirkungen verschiedener geometrischer Parameter der Anordnung auf die Größe des Dosis-build-up-Faktors.

1. Der Einfluß der Feldgröße.

Mißt man den Dosis-build-up-Faktor B_∞ hinter einer Schutzwand mit unendlich großer Fläche, welche in ihrer ganzen Ausdehnung bestrahlt wird, so besitzt das vom Meßgerät aufgenommene Strahlenbündel einen Öffnungswinkel von 180^o. Bei einer Schutzwand von endlicher Fläche ist dieser Winkel kleiner, also auch die Dosisleistung D geringer als D_∞ , man findet daher

(5 a) $\qquad B \leq B_\infty$.

Bewegt man das Meßgerät in Richtung auf die Schutzwand, so nähert sich die Größe des Öffnungswinkels der gemessenen Streustrahlung mehr und mehr dem Wert von 180^o. Ob man die gleiche Streustrahlenmenge mißt, wie bei einer unendlich ausgedehnten Wand, hängt davon ab, ob bei Vergrößerung der Wandfläche, bzw. des bestrahlten Teils der Wand, die neu hinzukommenden peripheren Wandteile noch nennenswerte Mengen von Streustrahlung am Ort des Meßinstrumentes erzeugen.



Meßanordnung zur Bestimmung der Dosisleistung bei großem Feldquerschnitt bis zu 2500 cm^2.

Abb. 8

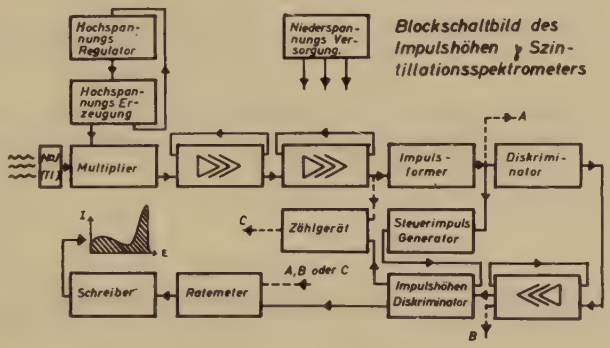


Abb. 9

Prinzipschaltbild der Meßapparatur.

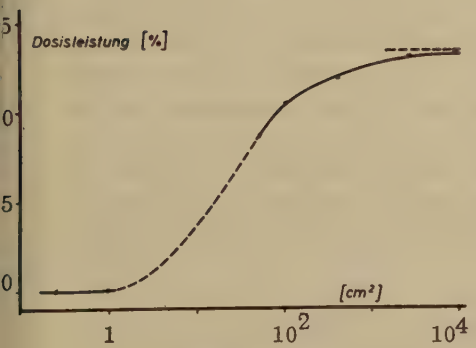


Abb. 10

Dosisleistung als Funktion der Feldgröße für einen Co^{60}-Strahler und 20 mm Bleiabsorber. (Dosisleistung ohne Absorber = 100 %). Die obere horizontale gestrichelte Linie ist berechnet aus den in der Literatur veröffentlichten Dosis-build-up-Faktoren B * (22).

Um dies zu prüfen, wurde die Dosisleistung unter Änderung der Feldgröße hinter einer 20 mm dicken Bleiwand relativ zur Einfallsdosisleistung D^o gemessen. Wie aus Abb. 10 hervorgeht, wird mit wachsender Feldgröße ein Grenzwert erreicht, der als gestrichelte horizontale Linie eingezeichnet ist und mit dem Wert übereinstimmt, welcher sich unter Verwendung des in der Literatur veröffentlichten B^* (22) errechnen läßt. Es ergeben sich mit $D^o = 100\ \% = D_o^o$ die Werte $D_o = 30\ \%$ und $D_\infty = 43,5\ \%$. Der Dosis-build-up-Faktor ergibt $B_\infty = D_\infty / D_o = 43,5 / 30 = 1,45$. Für eine Feldgröße von 2500 cm^2 wird $B_{2500} = D / D_o = 43,2 / 30 = 1,44$ gemessen. Es unterscheiden sich also B_{2500} und B_∞ um weniger als 1 %, wenn für B eine Feldgröße von 2500 cm^2 gewählt wird. Also gilt

(5 b) $$B_{2500} = B_\infty$$

Als Strahler wurde bei diesen Versuchen ein Co^{60}-Präparat in 80 cm Entfernung vom Meßinstrument verwendet. Letzteres lag direkt am Absorber an.

2. Der Einfluß des Abstandes Strahlungsmeßgerät - Strahler.

Die Strahlendosis, welche man bei großem Feld hinter einer Schutzwand mißt, ist weiterhin eine Funktion des Strahlerabstandes von dieser Wand. Bei kleinem Abstand ist der Öffnungswinkel der einfallenden Strahlung sehr groß (Abb. 11) und ein Teil der Strahlung durchdringt den Absorber unter einem großen Winkel, wird also wegen des langen Weges in der Wand stark geschwächt. Nur ein relativ kleinerer Anteil als bei senkrecht auftreffender Parallelstrahlung erreicht die dem Meßgerät zugekehrte Seite des Absorbers. Daher wird das Gerät entsprechend weniger Streustrahlung registrieren. Die Weglänge der Strahlung im Absorber wird kürzer mit zunehmendem Abstand des Strahlers von der Wand; entsprechend erreicht der Dosis-build-up-Faktor immer größere Werte und schließlich bei unendlichem Abstand ein Maximum. Die Messung (Abb. 12) erfolgte wieder mit einem Co^{60}-Präparat, einer Pb-Wand von 20 mm

Dicke und einem am Absorber anliegenden Meßinstrument, aber jetzt unter Änderung des Strahlerabstandes von der Wand. Die relative Dosisleistung nähert sich asymptotisch mit wachsendem Abstand des Strahlers von der Wand bzw. von dem Meßinstrument dem gestrichelt eingezeichneten Maximalwert, den sie bei 80 cm Abstand zwischen Strahler und Meßgerät bei einer Feldgröße von 2500 cm^2 praktisch erreicht hat. Es genügt also, bei der B_∞ - Messung diese 80 cm nicht zu unterschreiten. Im Bereich der benutzten Wandstärken - bis zu 48 cm - braucht der Abstand Strahler - Meßinstrument nicht vergrößert zu werden, wie es bei noch größeren Absorberdicken allerdings unvermeidlich ist.

3. Der Einfluß des Abstandes Strahlungsmeßgerät - Absorber.

Da das Schutzwandmaterial zuweilen eine recht unebene Oberfläche aufweist, interessierte, welche Rolle der Abstand des Meßgerätes von der Absorberoberfläche für die Genauigkeit des ermittelten build-up-Faktors spielt. Aus dem oben Gesagten geht schon hervor, daß das Meßinstrument möglichst nahe an die Oberfläche herangebracht werden muß, um einen Öffnungswinkel von 180^o für die Streustrahlung zu erhalten. Die Messungen sind in Abb. 13 dargestellt.

Es ist ersichtlich, daß eine Variation des Abstandes Meßgerät - Absorber im Bereich von 0 - 20 mm keinen Einfluß auf das Meßergebnis hat. Bei weiterer Abstandsvergrößerung sinkt allerdings die relative Dosisleistung bei großem Feld rasch ab und erreicht bei etwa 3 m Abstand den Wert, welchen sie bei einer Feldgröße von 0,25 cm^2 unabhängig vom Abstand des Meßgerätes vom Absorber hat; d.h., sie erreicht die Werte, die für einen engen Bündelquerschnitt gelten. Von diesem Befund wird später Gebrauch gemacht werden.

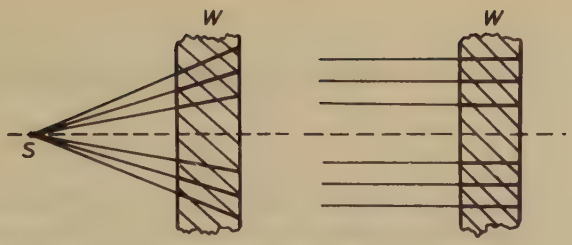


Abb. 11

Der von einer Strahlung im Absorber zurückgelegte Weg ist bei kleinem Abstand Strahler S - Absorber W größer als bei weiterem.

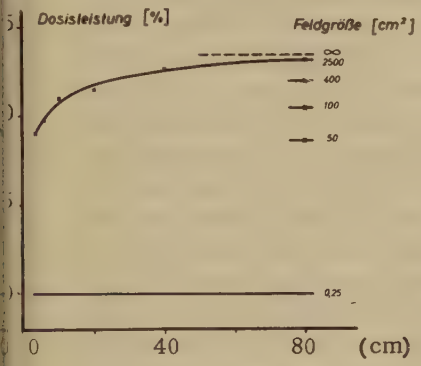


Abb. 12

Dosisleistung als Funktion des Abstandes Strahlenquelle - Meßgerät für verschiedene Feldgrößen. Co^{60}-Strahlung, 20 mm Pb - Absorber, Meßgerät an der Wand anliegend, Dosisleistung ohne Absorber jeweils = 100 %.

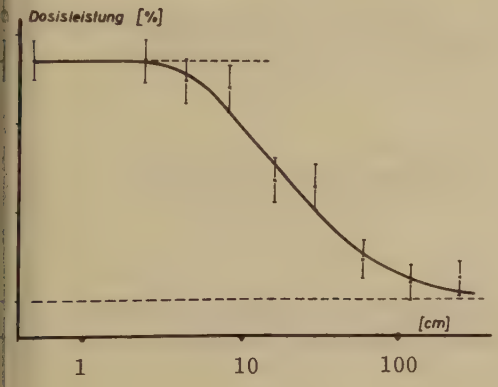


Abb. 13

Dosisleistung als Funktion des Abstandes Absorber - Strahlungsmeßgerät. Co^{60}-Strahlung, 20 mm Pb-Absorber, Feldgröße 2500 cm^2 (ausgezogene Linie) und 0,25 cm^2 (untere gestrichelte Linie) Dosisleistung ohne Absorber jeweils = 100 %, Abstand Strahler - Absorberrückseite = 80 cm.

c. Die Mängel der beschriebenen Methode.

Zur Berechnung des Dosis-build-up-Faktors nach der obigen Methode ist die Kenntnis der Schwächungskonstanten μ erforderlich, wobei ein geringer Fehler von μ eine große Ungenauigkeit der Dosisleistung D_o und damit auch des build-up-Faktors bewirkt. So ergibt sich z.B. eine Dosisleistungsungenauigkeit um den Faktor 3, wenn die Strahlung durch einen Absorber um das $2 \cdot 10^4$ - fache herabgesetzt wird und μ einen Fehler von $\pm$ 10 % enthält. Liegt für μ nur eine Ungenauigkeit von $\pm$ 2 % vor - dies ist der Fehler, welchen die zuverlässigsten bekannten Werte des Schwächungskoeffizienten wohl erreichen (22 , 52, 53) -, so ergibt sich bei der gleichen Schwächung immerhin noch eine Dosisleistungstoleranz von $\pm$ 20 %. Die optimale Genauigkeit von $\pm$ 2 % ist selbst dann nur schwer zu erreichen, wenn das μ an sehr dicken Schichten des Absorbers bestimmt wird. Bei einer solchen Messung kommt ferner hinzu, daß sich D_o und das stets zur Berechnung notwendige D_o^o um mehrere Größenordnungen unterscheiden, welche der Meßbereich des Strahlungsmeßgerätes umfassen muss, ohne daß dessen Genauigkeit darunter leiden darf. Aus diesen Überlegungen geht hervor, daß prinzipiell keine höheren Genauigkeiten als $\pm$ 10 bis 20 % für den Dosis-build-up-Faktor in größeren Schichttiefen zu erreichen sind. Dies entspricht etwa den Fehlerangaben, welche in der Literatur für B^* gemacht werden (17, 22).

C. Die Messung des Dosis-build-up-Faktors B_∞ mit großer Genauigkeit ohne Benutzung des Schwächungskoeffizienten μ .

a. Beschreibung der Meßanordnung.

Um den genannten Meßschwierigkeiten und Meßfehlern zu entgehen, wurde eine Meßanordnung nach Abb. 14 aufgebaut, bei welcher die Bestimmung

des Dosis-build-up-Faktors B_∞ unabhängig von der μ - Messung möglich ist.

Der Absorber B - aus gleichem Material wie der Absorber A - befindet sich in einem Abstand von 3 m von dem Strahlungsmeßgerät. Aus der Abb. 13 ist zu entnehmen, daß eine Wand von 50 x 50 cm^2 in einer Entfernung von mehr als 2 m vom Meßinstrument sich unter den angegebenen Versuchsbedingungen praktisch so verhält, als würde an ihr eine Messung mit kleiner Feldgröße vorgenommen. Das heißt aber nichts anderes, als daß der build-up-Faktor den Wert 1 hat. Zusätzlich ist noch gegenüber den Bedingungen der Abb. 13 die Größe der Oberfläche, von der Streustrahlung aus B auf das Meßinstrument fallen kann, durch eine Blende von 2500 auf 50 cm^2 verringert worden. Eine kurze Rechnung möge den Gang der Messung demonstrieren.

Es sei die Dosisleistung, welche man mit der Vorrichtung mißt, wenn die Absorber A und B fortgenommen sind, gleich D_o^o. Bringt man jetzt beide Mauern mit den Dicken a und b vor die Strahlenquelle (dorthin, wo in Abb. 14 nur der Absorber B eingezeichnet ist), so mißt man die gleiche Dosisleistung wie im engen Bündel, also

$$(6) \qquad D_o = D_o^o \, e^{-\mu (a+b)} .$$

Wird die Platte A fortgenommen, B dort belassen, so zeigt das Instrument die Dosisleistung D_o' an:

$$(7) \qquad D_o' = D_o^o \, e^{-\mu b} .$$

Bringt man nun auch A in den Strahlengang, aber wie in Abb. 14 gezeigt, unmittelbar vor das Meßinstrument, dann ergibt sich die Dosisleistung

$$(8) \qquad D = D_o' \, e^{-\mu a} \, B_\infty (a)$$

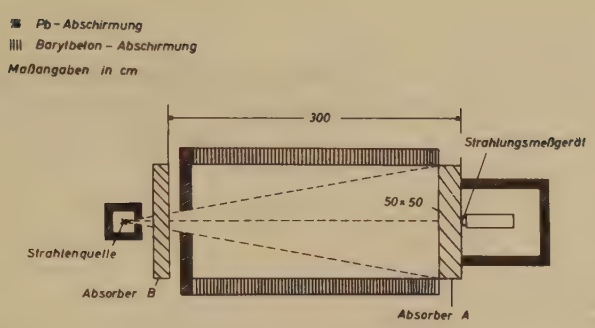


Abb. 14

Meßanordnung zur Messung des Dosis-build-up-Faktors, bei der eine Kenntnis des Schwächungskoeffizienten μ zur Berechnung des Dosis-build-up-Faktors nicht erforderlich ist.

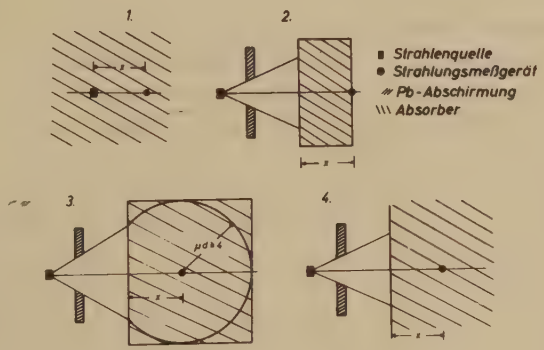


Abb. 15

Darstellung verschiedener geometrischer Verhältnisse, für die build-up-Faktoren berechnet oder gemessen wurden. 1. Meßgerät und Strahlenquelle befinden sich beide innerhalb des unendlich ausgedehnten Absorbers, B^* ; 2. Ein Absorber wird auf einer Fläche von 2500 cm^2 bestrahlt, $B_{2500} = B_\infty$; 3. Das Meßgerät ist von mindestens 4 Relaxationslängen Absorber umgeben, B^* ; 4. Das Meßgerät liegt innerhalb eines halbseitig unendlich ausgedehnten Absorbers, B^* .

d.h. die Dosisleistung im engen Bündel $D_o^o e^{-\mu a}$ multipliziert mit dem Dosis-build-up-Faktor B_∞ (a) des Absorbers A der Dicke a. Aus den Gleichungen (7) und (8) folgt

$$(9) \qquad D = D_o^o \; e^{-\mu(a+b)} \; B_\infty (a) ,$$

und aus (6) und (9) ergibt sich durch Division

$$(10) \qquad B_\infty (a) = D / D_o .$$

Gleichung (10) hat die gleiche Form, wie die vorher zur Berechnung von B_∞ benutzte (1) . Doch sind wesentliche Unterschiede zu vermerken: In (1) wurde D_o mit Hilfe von μ berechnet und änderte sich mit zunehmender Schichtdicke um viele Zehnerpotenzen. In Gleichung (10) wird D_o gemessen und ist für die gesamte Meßreihe konstant. Verändert werden nur a und b, während ihre Summe a + b = c vorher festgelegt wird; c muß gleich der maximalen Schichtdicke sein, welche gemessen werden soll. Dann läßt sich der Dosis-build-up-Faktor im Bereich von B_∞ (o) bis B_∞ (c) durch Variation des Verhältnisses a:b messen. Ferner änderte sich in (1) D nahezu im gleichen Maße wie D_o. Das Meßgerät mußte also in diesem Fall einen Dosisleistungsbereich von vielen Zehnerpotenzen umfassen. In (10) dagegen unterscheidet sich D vom konstanten D_o nur um den Betrag des build-up-Faktors, also allenfalls um eine bis zwei Zehnerpotenzen, die leicht mit großer Genauigkeit erfaßt werden können. Schließlich geht in die Berechnung des Dosis-build-up-Faktors nach Gleichung (1) der Fehler des μ entscheidend ein, während bei einer Messung nach Abb. 14 der Schwächungskoeffizient μ überhaupt nicht benötigt wird.

b. Untersuchungen über die Brauchbarkeit der Methode für Strahlenschutzmaterialien verschiedener Ordnungszahlen.

Um die vorstehend beschriebene Methode nochmals zu überprüfen, wurden die für eine Feldgröße von 2500 cm^2 gemessenen Dosis-build-up-Faktoren mit den B^* verglichen. In Tabelle I sind die Werte für B^* (22) und B_{2500} (eigene Messungen) einander gegenüber gestellt und es zeigt sich, daß innerhalb der Meßfehlergrenzen

(11) $$B^* = B_{2500}$$

ist. Zusammen mit Gleichung (5) folgt hieraus, daß die gemessenen Dosis-build-up-Faktoren mit B_∞ übereinstimmen,

(5) $$B_{2500} \leq B_\infty \leq B^*$$

(5) $$B_\infty = B_{2500}$$

ein Ergebnis, daß schon aus den Messungen zu den Abb. 10, 12 und 13 auf einem anderen Wege erhalten wurde.

Tabelle I

Dosis-build-up-Faktoren für harte Strahlung (1,25 MeV γ - Strahlung) und Absorber hoher Ordnungszahl (Pb).

μx	1	2	4	7
B^* (22)	1,38	1,73	2,37	3,25
B_{2500}	1,4	1,7	2,3	3,2

Nun ist jedoch für die Mehrzahl der gebräuchlichen Strahlenschutzstoffe die effektive Ordnungszahl niedriger als die des Bleis. Da mit abnehmender Ordnungszahl der Anteil der Comptonstreuung an der Schwächung zunimmt, ist mit der Möglichkeit zu rechnen, daß sich größere Unterschiede zwischen den build-up-Faktoren für niederatomiges Material bei endlichem und unendlichem Absorber finden würden. Deshalb wurden auch diese Fälle in die Untersuchungen mit einbezogen. Als Absorber wurde ein Barytbeton der Dichte 3,2 g cm^{-3} und γ - Strahlung von 1,25 MeV bzw. Röntgenstrahlung von 300 kV gewählt. Da für Barytbeton keine Angaben über einen B^* - Wert in der Literatur zu finden waren, wurden eigene Messungen sowohl am endlichen B_{2500} als auch am "unendlichen" Absorber vorgenommen. Letzterer wurde dargestellt, indem das am Absorber anliegende Meßinstrument seitlich und rückwärtig mit einer Schicht Barytbeton umgeben wurde, deren Dicke einer Schicht von mindestens vier Relaxationslängen für die Primärstrahlung entsprach (Abb. 15,3). Die Meßergebnisse sind in den Tabellen II und III zusammengestellt.

Tabelle II

Dosis-build-up-Faktoren für harte Strahlung und Absorber mittlerer effektiver Ordnungszahl (1,25 MeV γ - Strahlung, Barytbeton D=3,2.+)

x(cm)	3	6	12	24	36
μx	0,51	1,01	2,03	4,06	6,09
B^*	1,4	1,7	2,3	4,6	7,7
B_{2500}	1,35	1,65	2,5	4,6	7,6

+ ca. 90 Gew. % Ba S 0_4 .

Tabelle III

Dosis-build-up-Faktoren für weiche Strahlung und Absorber mittlerer effektiver Ordnungszahl (300 kV Röntgenstrahlung 2mm Pb gefiltert, Barytbeton D = 3,2) .

x (cm)	3	6	9	12
μ x $\approx$	2,16	4,32	6,48	8,64
B^*	1,6	2,0	2,3	2,7
B_{2500}	1,64	1,71	2,25	2,62

Aus den Tabellen ist ersichtlich, daß auch in diesem Fall

(5 b) $B_\infty = B_{2500}$

ist.

Um eine Abschätzung zu erhalten, ob die Methode ebenfalls für Material niederer Ordnungszahl geeignet ist, wurden B^* - Werte für ein halbseitig unendlich ausgedehntes Wasserphantom aus (50) Literaturangaben berechnet (Bestrahlungsfeldgröße 20 x 20 cm^2, Röntgenstrahlung von 220 kV, 2 mm Cu Halbwertschicht) und mit eigenen, am endlichen Absorber gemessenen Werten, verglichen. Wie aus Tabelle IV zu ersehen ist, weichen mit zunehmender Schichtdicke die Werte von einander immermehr ab. Aus diesen Messungen ist aber lediglich zu schließen, daß B_∞ in einer Schichttiefe von 4 Relaxationslängen bereits bis zu 20 % größer sein kann als das gemessene B. Es kann aber ebenso gut der Fall vorliegen, daß sich B und B_∞ nicht wesentlich unterscheiden, sondern nur infolge erhöhter Rückstreuung B^* merklich größer als B und B_∞ ist. Auch aus anderen fremden (2, 3, 4, 42) und eigenen Messungen geht hervor, daß letzteres nicht ausgeschlossen ist. Untersuchungen darüber

werden fortgeführt; sie sind im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht von Bedeutung.

Tabelle IV

Dosis-build-up-Faktoren für weiche Strahlung und Absorber niederer effektiver Ordnungszahl (220 kV Röntgenstrahlung, 2 mm Cu HWS, H_2O)

x (cm)	2,5	5,5	11	16,5	22
μ x $\approx$	0,45	1	2	3	4
B^*	1,6	2,1	3,5	5,2	7,7
B	1,5	2,0	3,2	4,6	6,6
B^* / B	1,07	1,05	1,09	1,13	1,17

Aus den Untersuchungsergebnissen folgt also, daß für Stoffe hoher und mittlerer effektiver Ordnungszahlen mit dem geschilderten Meßverfahren in relativ einfacher Weise zuverlässige Werte für B_∞ ermittelt werden können. Allerdings ist die Methode nur bei praktisch monochromatischen Primärstrahlungen anwendbar. Liegen inhomogene Strahlungen vor, insbesondere bei Röntgenstrahlen, so sind diese für die Messungen durch entsprechende Vorfilterung homogen zu machen.

D. a. Die Berechnung des Dosisleistungsspektrums aus dem registrierten Impulsratenspektrum.

Wegen der geringen Dosisleistungen, welche bei Strahlenschutzmessungen zweckmäßig verwendet werden, ist die Benutzung eines empfindlichen

Szintillationszählers als Meßinstrument naheliegend. Derartige Zähler haben den Nachteil, daß sie nicht unmittelbar Dosisleistungswerte angeben, auf die es im Strahlenschutz ankommt, sondern Impulsratenspektren. Es ist daher eine Umrechnung der gemessenen Größen auf Dosisleistungswerte erforderlich (31). Für die Praxis hat sich dabei das folgende Verfahren bewährt, dessen Brauchbarkeit anschließend experimentell gezeigt wird.

Ist μ_a^{Luft} der Absorptionskoeffizient für Luft, E die Energie des Einzelquants einer monochromatischen Strahlung und N die Zahl der Quanten, welche je cm^2 und sec senkrecht auf die ebene Oberfläche eines bestrahlten Luftvolumens treffen, so wird in einem Volumen von 1 cm^2 Querschnitt und der Dicke dx eine Strahlungsleistung dS absorbiert von der Größe

$$(12) \qquad dS = \mu_a^{Luft} \cdot N \cdot E \cdot dx .$$

Nun ist

$$(13) \qquad \text{Dosisleistung} = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{Masse}} .$$

Die Masse dm des obigen Luftvolumens von 1 cm^2 Querschnitt und der Dicke dx ist aber, wenn ρ^{Luft} die Dichte der Luft bedeutet,

$$(14) \qquad dm = \rho^{Luft} dx$$

und folglich die Dosisleistung, welche das Luftvolumen der Dicke dx erhält

$$(15) \qquad D = \mu_a^{Luft} \cdot N \cdot E \cdot \rho^{Luft^{-1}} \quad \text{(gemessen z. B. in eV/g·sec)} .$$

In dieser Gleichung wird μ_a^{Luft} für den Quantenenergiebereich von 0,06 bis 2,5 MeV als praktisch konstant angenommen mit dem Zahlenwert

(16) $$\mu_a^{Luft}/\rho = 2,65 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1} .$$

Die Anzahl N der pro cm^2 und sec auftreffenden Quanten kann aus der Zahl der je sec registrierten Impulse J berechnet werden, wie die folgende Überlegung zeigt:

Wenn der Kristall eine Fläche F senkrecht zur Strahlrichtung aufweist, so werden N · F Photonen in den Kristall pro sec eintreten. Es wird aber keineswegs jedes einfallende Photon auch registriert, da ein Teil der Quanten den Kristall ohne Absorption durchläuft. Die Zahl der insgesamt registrierten Impulse ist daher nicht gleich N · F sondern

(17) $$J = \varepsilon \cdot N \cdot F ,$$

wobei ε die Ansprechwahrscheinlichkeit des Kristalls ist (36), die angibt, welcher Bruchteil der eintretenden Photonen registriert wird. ε ist eine Funktion der Photonenenergie und des Abstandes des Kristalls von der Strahlenquelle. Abb. 16 gibt den Zusammenhang wieder, dabei ist der Abstand des Kristalls von der Strahlenquelle als unendlich groß angenommen worden.

Für eine monochromatische Strahlung der Quantenenergie E folgt aus den Gleichungen (15) und (17)

(18) $$D = \mu_a^{Luft} \cdot \varepsilon^{-1} \cdot F^{-1} \cdot J \cdot E \cdot \rho^{Luft^{-1}} .$$

Das registrierte Spektrum einer solchen Strahlung zeigt jedoch nicht nur eine monochromatische Linie, wie es der tatsächlich vorhandenen Strahlung entspräche, sondern weist zusätzlich Anteile auf, deren Energie

niedriger als die der Primärstrahlung ist. Dieser Effekt beruht bekanntlich darauf, daß ein Teil der Quanten nicht vollständig absorbiert wurde, und daher so registriert wird, wie Quanten geringerer Energie (Abb. 17). Ferner tritt durch den Kristall und die elektronische Apparatur noch eine Linienverbreiterung auf, die in Abb. 17 nicht dargestellt ist. Da die Zahl der insgesamt gemessenen Impulse gleich J ist, kann die Gleichung (18) zur Dosisleistungsberechnung angewandt werden.

Falls jedoch die Primärstrahlung Quanten verschiedener Energien aufweist, überlagern sich im registrierten Spektrum die Primärenergien und die dazugehörigen weicheren Spektrumsanteile, so daß es schwierig ist, die einzelnen Komponenten zu trennen. - Bei vielen Meßproblemen kennt man die Zusammensetzung der Primärstrahlung aber nicht sicher; deshalb mußte ein anderer Weg zur Berechnung der Dosisleistung aus dem Impulsratenspektrum beschritten werden, der gleichzeitig auch berücksichtigt, daß die Streustrahlung, welche in einer Wand W (Abb. 3) entsteht, keinen einheitlichen Fokusabstand vom Meßgerät hat. Das ε wird, entgegen den tatsächlichen Verhältnissen, bei dieser Berechnungsmethode als unabhängig vom Fokusabstand angesehen und jeweils das ε für unendlich großen Fokusabstand in die Rechnung eingesetzt.

Zur Durchführung der Dosisleistungsberechnung zerlegt man das Impulsratenspektrum der polychromatischen Strahlung in eine Reihe n von Energieintervallen der Breite Δ E und wendet auf jedes dieser Intervalle die Gleichung (18) an. Man rechnet also so, als ob alle Impulse eines Energieintervalles i (i = 1 bis n) ausschließlich durch Quanten der diesem Intervall entsprechenden Energie E_i ausgelöst seien. Dann wird über alle Intervalle summiert und man erhält

$$(19) \quad D = k^{-1} \sum_{i=1}^{n} \mu_a^{\text{Luft}} \cdot \varepsilon(E_i)^{-1} \cdot F^{-1} \cdot J(E_i) \cdot E_i \cdot \Delta E \cdot \varrho^{\text{Luft}^{-1}} .$$

Der Korrekturfaktor k wird eingeführt, um durch passende Wahl seiner Größe die im Rechnungsgang erfolgten Vereinfachungen ausgleichen zu können. Seine Größe wird experimentell bestimmt, indem für fünf verschiedene Röntgen- und γ - Strahlungen die Dosisleistungen a. mit üblichen Ionisationsmeßgeräten gemessen werden und b. aus den registrierten

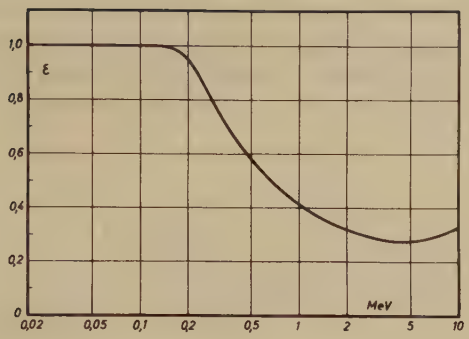
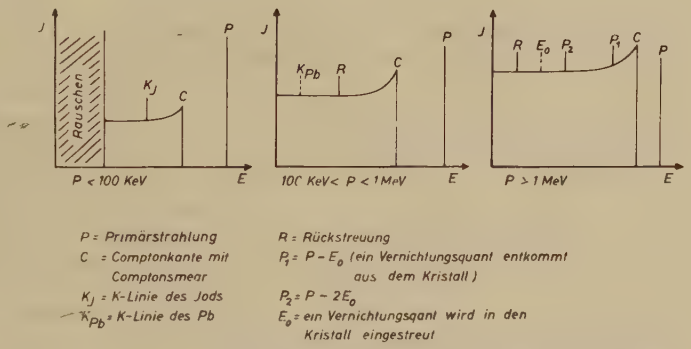


Abb. 16

Ansprechwahrscheinlichkeit ε (E) des Meßinstrumentes (NaJ, Tl - Kristall, 3,7 cm x 2,5 cm) in Abhängigkeit von der Strahlenqualität nach ORNL (36).



P = Primärstrahlung
C = Comptonkante mit Comptonsmear
K_J = K-Linie des Jods
K_{Pb} = K-Linie des Pb
R = Rückstreuung
$P_1 = P - E_0$ (ein Vernichtungsquant entkommt aus dem Kristall)
$P_2 = P - 2E_0$
E_0 = ein Vernichtungsqant wird in den Kristall eingestreut

Theoretisches Aussehen von mit NaJ (Tl) gemessenen γ-Spektren für verschiedene monochromatische γ-Strahlungen

Abb. 17

Theoretisches Aussehen der Impulshöhenspektren monochromatischer γ-Strahlungen verschiedener Quantenenergien. Linkes Bild: Quantenenergie $\leq$ 100 keV, Mitte: Quantenenergie zwischen 0,1 und 1 MeV und rechts größer 1 MeV.

Impulsratenspektren (Abb. 18) in der beschriebenen Weise berechnet werden (Gleichung (19)). Die Ergebnisse sind in Tabelle V zusammengestellt. Spalte 6 enthält die gemessene Dosisleistung, Spalte 5 die berechnete D • k und Spalte 7 den sich jeweils ergebenden Korrekturfaktor k.

Tabelle V

Zusammenhang zwischen den Impulsratenspektren verschiedener Strahlungen und ihrer gemessenen Dosisleistung.

Spalte 1	2	3	4	5	6	7
Strahlung	Spektren J(E) Abb. 18	Gesamtimpulsrate • 10^3 $cm^2 \cdot min^{-1}$	berechnete Dosisleistung D•k für ε (E)=1 (mr/h)	berechnete Dosisleistung D • k (mr/h)	gemessene Dosisleistung (mr/h)	k
180 kV Röntgenstrahlung, etwa 5 mm Pb gefiltert	1	29	0,097	0,097	0,105	0,925
300 kV Röntgenstrahlung, etwa 1 cm Pb gefiltert	2	105	0,55	0,625	0,68	0,92
Cs^{137}-Strahlung 0,66 MeV	3	20	0,21	0,345	0,37	0,935
Co^{60}-Strahlung 1,17+1,33 MeV	4	7,8	0,23	0,5	0,54	0,925
Ra + Folgeprodukte γ-Strahlung, etwa 1 cm Pb gefiltert	5	25	0,68	1,66	1,77	0,94

Aus diesen Messungen ergibt sich für k im Mittel der Wert

(20) $k = 0{,}929 \pm 0{,}004$.

Eine solche Mittelwertbildung kann vorgenommen werden, da sich innerhalb der Meßfehlergrenzen keine Energieabhängigkeit von k für Strahlungen zwischen ca. 0,1 und 2,2 MeV zeigte. Dieser Wert von k ist selbstverständlich eine Apparatekonstante und gilt nur für die verwendete Meßapparatur und die geschilderte Art der Auswertung. Er läßt sich aber auch für andere Meßgeräte bestimmen. Deshalb sollen noch einige Angaben über die direkte Dosisleistungsmessung (Tabelle V, Spelte 6) gemacht werden, welche unter den vorliegenden Bedingungen - niedrige Dosisleistung, großer Spektralbereich, hoher erforderlicher Genauigkeitsgrad - einigen Aufwand erfordert.

Als Dosisleistungsmeßgeräte wurden eine Faßkammer(34), Kondensatorkammern und eine Neher-White-Ionisationskammer benutzt. Die Kondensatorkammern und die Neher-White-Ionisationskammer wurden für Röntgenstrahlungen zwischen 150 und 300 kV mit der Faßkammer geeicht. Dies erlaubte eine Bestimmung der Dosisleistung mit einer Genauigkeit von $\pm$ 2 %. Sodann erfolgte für die Neher-White-Kammer eine Eichung durch Cs^{137} γ -Strahlung mit einem Fehler von $\pm$ 10 % und durch ein Ra - Standard - Präparat mit einer Genauigkeit von $\pm$ 3 % (18, 29) . Bei den dann folgenden Messungen wurden für Röntgenstrahlen sowohl die Kondensatorkammern als auch die Neher-White-Ionisationskammer benutzt. Die Dosisleistungen der γ -Strahlungen wurden nur mit der Neher-White-Kammer bestimmt. Daraus resultiert für alle gemessenen Dosisleistungen eine mittlere Genauigkeit von $\pm$ 4 %.

Es kann also gesagt werden, daß die Berechnung der Dosisleistung aus einem Impulsratenspektrum nach Gleichung

$$(19) \quad D = k^{-1} \sum_{i=1}^{n} \mu_a^{Luft} \cdot \varepsilon (E_i)^{-1} \cdot F^{-1} \cdot J(E) \cdot E_i \cdot \Delta E \cdot \varrho^{Luft^{-1}}$$

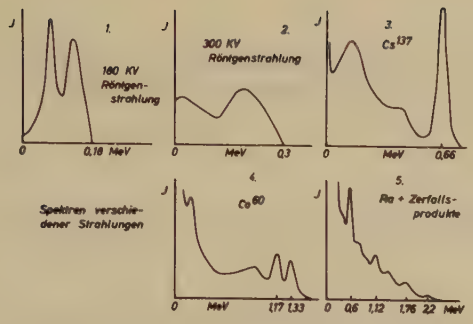


Abb. 18

Impulsratenspektren verschiedener Strahlungen.

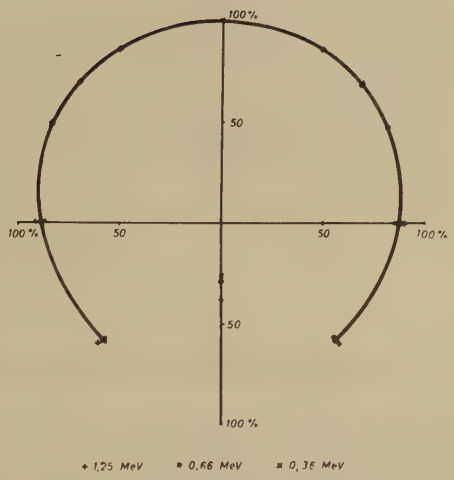


Abb. 19

Richtungsempfindlichkeit des verwendeten Szintillationszählers für verschiedene Strahlungen.

unter Verwendung des Korrekturfaktors k nach Gleichung (20) mit einer Genauigkeit von ± 4 % für Strahlungen zwischen 0,1 und 2,2 MeV erfolgt.

b. Gesichtspunkte zur Auswahl eines geeigneten Meßinstrumentes.

Es seien kurz einige Gesichtspunkte angefügt, die bei der Auswahl eines geeigneten Meßinstrumentes zu beachten bzw. zu überprüfen sind. Aus der Diskussion der Meßmethode geht hervor, daß das verwendete Meßgerät 1. eine Dosisleistungsmessung gestatten muß, 2. eine gleichbleibende Empfindlichkeit für Strahlungen aus einem Raumwinkel von 180 ^{o} besitzen muß, es 3. nicht zu groß sein darf und es schließlich 4. möglichst empfindlich sein sollte, um mit kleinen Präparatstärken und großen Absorberdicken arbeiten zu können. Die aufgezählten Bedingungen werden recht gut von einem Szintillationszähler erfüllt. Es läßt sich die Dosisleistung berechnen, wie oben gezeigt wurde. - Die Richtungsempfindlichkeit mußte überprüft werden. Sie ist in einem Raumwinkel größer als 180^{o} hinreichend konstant, wie Abb. 19 zeigt. - Über die maximale Größe des Meßgerätes gibt Abb. 13 Aufschluß. Wenn sich ein wesentlicher Bruchteil des Meßinstrumentes vom Absorber weiter als ca. 2 cm entfernt, befindet, erhält dieser merklich weniger Streustrahlung und führt zu falschen Ergebnissen. Mit seiner Größe von 3,7 cm Ø x 2,5 cm Dicke erfüllt der Szintillationszähler auch diese Voraussetzung. Er ist z. Z. das brauchbarste Meßinstrument für die geschilderten Untersuchungen.

E. Zusammenstellung der erzielten Meßergebnisse.

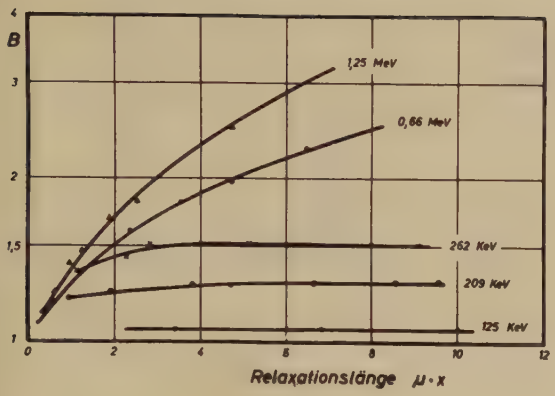
Die mit dem beschriebenen Verfahren gemessenen Dosis-build-up-Faktoren sind in Tabelle VI für Pb und verschiedene Strahlungen zusammengestellt. In Abb. 20 sind diese Werte in Diagrammen wiedergegeben. Dabei stimmen die Kurven für 0,66 und 1,25 MeV mit den Werten überein, die in der Literatur (22) für B* angegeben werden. Die eingezeichneten Punkte

Tabelle VI

Dosis-build-up-Faktoren B_∞ für Blei und verschiedene Strahlungen.

Strahlung	μ cm^{-1}	x mm	μx	B_∞	x mm	μx	B_∞
150 kV Rö	34	1	3,4	<1,1	2	6,8	<1,1
E_{max} ≙125kV		4	13,6	<1,1	5	17	<1,1
250 kV Rö	9,54	1	0,95	1,2	2	1,91	1,23
E_{max} ≙209kV		4	3,82	1,27	5	4,77	1,27
		7	6,68	1,28	9	8,59	1,28
		10	9,54	1,29			
300 kV Rö	5,38	2	1,14	1,35	4	2,27	1,43
E_{max} ≙262kV		5	2,84	1,51	7	3,98	1,51
		9	5,12	1,51	14	7,95	1,52
		16	9,1	1,52			
0,66 MeV γ	1,178	2	0,24	1,08	5	0,59	1,18
Cs 137		10	1,18	1,34	20	2,36	1,60
		30	3,54	1,80	40	4,72	1,98
		55	6,48	2,28			
1,25 MeV γ	0,631	5	0,316	1,13	10	0,63	1,23
Co 60		15	0,95	1,40	20	1,26	1,47
(1,17 + 1,33)		30	1,89	1,69	40	2,52	1,81
		75	4,73	2,50			

sind eigene Meßwerte, ebenso alle Werte für 150, 250 und 300 kV; für welche in der Literatur bisher keine Angaben über B^* zu finden waren. Die für diese verwendete Röntgenstrahlung war so stark vorgefiltert, daß sich ihr Spektrum bei weiterer Filterung nicht mehr änderte. Die Halbwertbreite der Spektren, deren Maxima bei 125, 209 bzw. 262 kV lagen,.



Dosis-build-up-Faktoren B_∞ für Blei in Abhängigkeit von der Relaxationslänge für verschiedene Strahlungen.

Abb. 20

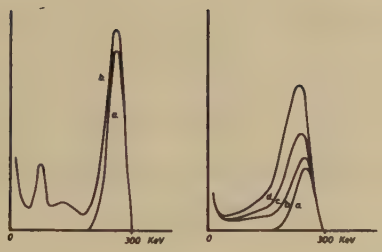
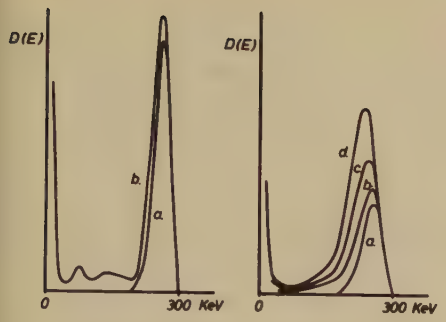


Abb. 21

Impulsratenspektren einer 300 kV Röntgenstrahlung, links nach Durchgang durch 5 mm Pb Absorber. Kurve a. entspricht der ungestreuten, b der gestreuten + ungestreuten Strahlung, gemessen bei großem Feldquerschnitt. Rechts sind b., c. und d. die Spektren der Gesamtstrahlung nach Durchgang durch 30, 90 bzw. 180 mm Barytbeton, jedes dieser Spektren bezogen auf die gleiche Dosisleistung der ungestreuten Strahlung, d.h. bezogen auf die gleiche Kurve a.; dabei ist zu bemerken, daß die Vorfilterung der Röntgenstrahlung so stark war, daß sich das Spektrum der ungestreuten Strahlung - Kurve a. - nach Durchgang durch Schichten von 30 bis 180 mm Barytbeton nicht mehr meßbar änderte.



Spektren der Abb. 21 als Dosisleistungsspektren umgerechnet.

Abb. 22

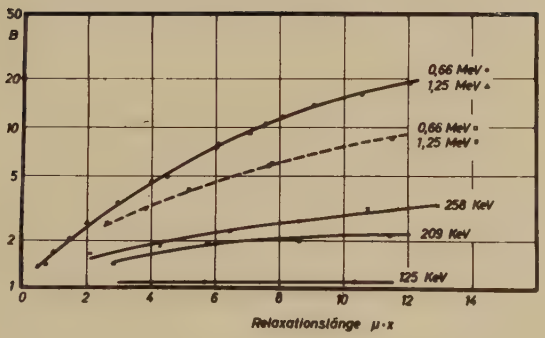


Abb. 23

Dosis-build-up-Faktoren B_∞ für Barytbeton (ausgezogene Kurven Dichte D = 3,2; gestrichelte D = 3,9) als Funktion der Relaxationslänge für verschiedene Strahlungen. Die Kurven für 0,66 und 1,25 MeV fallen jeweils zusammen.

entspricht gerade dem Auflösungsvermögen des Szintillationszählers, so daß aus den Spektren keine weiteren Angaben über die Zusammensetzung der Strahlung entnommen werden können (Abb. 21).

Ähnliche Messungen des Dosis-build-up-Faktors B_∞ wurden auch an Barytbeton vorgenommen, die Ergebnisse sind in Tabelle VII aufgeführt. Abb. 23 zeigt die Abhängigkeit des B_∞ von der Relaxationslänge mit der Strahlenqualität als Parameter. Für die Vorfilterung der Röntgenstrahlungen gilt auch hier das oben Gesagte. Bei beiden Betonarten fallen jeweils die Kurven für 0,66 und 1,25 MeV zusammen.

Die Genauigkeit der gemessenen Dosis-build-up-Faktoren B_∞ beträgt $\pm$ 5 %. Dieser Fehler setzt sich zusammen aus dem Fehler, welcher durch die Dosisleistungsmessung entsteht, Dichte- und Homogenitätsschwankungen des verwendeten Materials und den Abweichungen die auf der Verwendung eines endlichen bestrahlten Feldes beruhen. Die Fehler, welche durch die Impulsstatistik und die Schwankungen des elektronischen Teils der Apparatur entstehen, sind in den Genauigkeitsangaben, welche für die Dosisleistungsmessungen gemacht werden, enthalten.

Tabelle VII

Dosis-build-up-Faktoren B_{∞} für Barytbeton und verschiedene Strahlungen.

Strahlung	μ_{cm} -1	x mm	μx	B_{∞}	x mm	μx	B_{∞}
150 kV Rö $E_{max} \hat{=} 125$kV	1,9	30	5,7	< 1,1	60	11,4	<1,1
250kV Rö $E_{max} \hat{=} 209$kV	0,96	30	2,88	1,42	60	5,77	1,94
		90	8,65	1,99	120	11,5	2,19
300 kV Rö $E_{max} \hat{=} 258$kV	0,72	30	2,16	1,64	60	4,32	1,71
		90	6,48	2,25	120	8,64	2,62
		150	10,8	3,12	180	12,96	3,27
0,66 MeV Cs^{137}	0,25	30	0,75	1,40	60	1,5	2,00
		120	3,05	3,36	180	4,55	4,90
		240	6,05	7,50	300	7,60	10,5
		360	9,1	13,5	420	10,6	16
		480	12,1	19			
1,25 MeV Co^{60} (1,17 + 1,33)	0,169	30	0,507	1,35	60	1,01	1,65
		120	2,03	2,51	240	4,06	4,57
		360	6,09	7,6	420	7,1	9,2
		480	8,12	11,9			
Dichte 3,2 g · cm^{-3} +)							
0,66 MeV	0,275	140	3,85	3,10	280	7,7	5,8
		420	11,55	8,7			
1,25 MeV	0,186	140	2,60	2,50	280	5,2	4,0
		420	7,8	5,9			
Dichte 3,9 g · cm^{-3} ++)							

+) Firmenbezeichnung Rö 6.

++) Firmenbezeichnung Gabaryt.

Beide Barytbetonarten von der Firma Vereinigte Werke Dr. Rudolf Alberti und Co., Bad Lauterberg/Harz.

F. Zusammenfassung.

Für die Berechnung einer Schutzwand für Strahlenschutzzwecke ist wegen der Ausdehnung der Wand und der damit verbundenen Erhöhung der Dosisleistung hinter der Schutzwand durch Streustrahlung nicht nur der Schwächungskoeffizient μ erforderlich, sondern zusätzlich der Dosis-build-up-Faktor B. Dabei sind drei build-up-Faktoren mit verschiedenem Inhalt zu unterscheiden:

a. Der Dosis-build-up-Faktor wird berechnet für eine Wand beliebiger Größe. Dieser build-up-Faktor kann keine Allgemeingültigkeit beanspruchen, er bezieht sich nur auf eine ganz spezielle Meßanordnung.

b. Der Dosis-build-up-Faktor wird berechnet für ein unendlich ausgedehntes Medium, in dem sich Strahler und Absorber befinden. Diese Werte sind in der Literatur veröffentlicht, sie sind theoretisch berechnet und teilweise gemessen worden, erreichen aber nur eine Genauigkeit von $\pm$ 10 bis 20 %. (B^*).

c. Der Dosis-build-up-Faktor wird berechnet für eine Wand unendlicher Größe. Allein dieser Wert B_∞ ist für den Strahlenschutz sinnvoll, da durch ihn die maximal hinter einer Schutzwand erreichte Dosisleistung berechnet werden kann.

Es wird eine Meßmethode beschrieben und untersucht, die gestattet, dieses B_∞ mit großer Genauigkeit ($\pm$ 5 %) an relativ kleinen Absorberstücken zu messen (Absorber der Größe 50 x 50 cm^2). Diese Meßanordnung ist geeignet für Strahlenschutzmaterialien hoher und mittlerer Ordnungszahlen. Ihre Meßergebnisse stimmen in dem genannten Bereich mit den B^* - Werten der Literatur überein. Für niederatomiges Material treten Abweichungen auf. - Es werden für verschiedene Materialien und Strahlungen Werte für B_∞ angegeben. Ferner wird eine Methode beschrieben, mit deren Hilfe aus den von einem Szintillationsspektrometer registrierten Impulsratenspektren Dosisleistungen mit einer Genauigkeit von $\pm$ 4 % berechnet werden können.

G. Literaturverzeichnis.

1. Aronson, R. NDA Memo 15C - 37 (1954).
2. Berger, M.J. WASH-145 (1953).
3. Berger, M.J. J.Res. NBS 56.111 (1956).
4. Berger, M.J. Doggett, J. J.Res. NBS 56.89 (1956).
5. Berger, M.J. Doggett, J. J.Res. NBS 56.355 (1956).
6. Bernstein, W. Weiss, M.M. BNL 1540 (1953).
7. Davisson, C.M. Evans, R.D. Phys.Rev. 81.401 (1951).
8. Davisson, C.M. Evans, R.D. Rev.Mod.Phys. 24.79 (1952).
9. van Dilla, Hine, G.J. Nucleon. 10(7).54 (1952).
10. Dixon, W.R. Phys.Rev. 85.498 (1952).
11. Ebert, H.G. Atompraxis 6.88 (1960).
12. Elliot, J.O. et al. Phys.Rev. 85.1048 (1952).
13. Fano, U. Nucleon. 11(8).8 (1953).
14. Fano, U. Nucleon. 11(9).55 (1953).
15. Fano, U. J.Res. NBS 51.95 (1953)
16. Fano, U. Spencer, L.V. Berger, M.J.
    Hdb.d.Phys. XXXVIII/2 (1959)
17. Garrett, C. Whyte, G.N. Phys.Rev. 95.889 (1954).
18. Ghosh, A. Kastner, J. Whyte, G.N. Nucleon. 11(6) · 70 (1953).
19. Glubrecht, H. Atompraxis 2.349 (1956)
20. Glubrecht, H. priv.Mitt. (1959)
21. Goldstein, H. The Attenuation of Gamma Rays and Neutrons
    in Reactor Shields. N.Y. (1957).
22. Goldstein, H. Fundamental Aspects of Reactor Shielding.
    Reading, Mass. (1959).
23. Goldstein, H. Aronson, R. NY 0-3079, NDA 15C-1 (1953).
24. Goldstein, H. Wilkins, J.E.Jr. NYO-3075 (1954).
25. Goldstein, H. Wilkins, J.E. Spencer, L.V.
    Phys.Rev. 89.1150 (1953).
26. Gussew, N.G. Leitfaden für Radioaktivität und
    Strahlenschutz (1957).
27. Hine, G.J. Brownell, G.L. Radiation Dosimetry. N.Y. (1956).
28. Hodgeman, Ch.D. Handbook of Chemistry and Physics (1957).
29. Jaeger, R.G. Dosimetrie und Strahlenschutz (1959).

30. Jaeger, R.G. Phys.Bl. 15.159 (1959).
31. Jaeger, R.G. Kolb, W. Strahlentherapie 104.29 (1957).
32. Jaeger, Th. Technischer Strahlenschutz (1959).
33. Kohlrausch, F. Praktische Physik (1956).
34. Küstner, H. Phys.Z. 39.743 (1938).
35. Latter, R. Kahn, H. R-170 (1949).
36. Mott, W.E. Sutton, R.B. Hdb.d.Phys. XLV (1958).
37. Niemann, E.G. Vortrag 2. Reaktortagung Hamburg (1959).
38. Peebles, G.H. J.Appl.Phys. 24.1272 (1953).
39. Peebles, G.H. J.Appl.Phys. 24.1437 (1953).
40. Phys.Techn.Bundesanstalt priv.Mitt. (1957).
41. Preiser, S. et al. NDA 10 - 144 (1954).
42. Price, B.T. Horton, C.C. Spinney, K.T. Radiation Shielding (1957).
43. Rockwell III, Th. Reactor Shielding Princeton (1956).
44. Sagel, K. Atompraxis 5.229 (1959).
45. Snyder, W.S. Powell, J.L. ORNL-421 (1950).
46. Spencer, L.V. Fano, U. J.Res.NBS 46.446 (1951).
47. Spencer, L.V. Fano, U. J.Res.NBS 51.95 (1953).
48. Spencer, L.V. Fano, U. Phys.Rev. 81.464 (1951).
49. Thoraeus, R. Acta Rad. 51.473 (1959).
50. Wachsmann, F. Dimotsis, A. Kurven und Tabellen für die Strahlentherapie Stuttgart (1957).
51. White, G.R. Phys.Rev. 80,154 (1950).
52. White, G.R. NBS Report 1003 (1952).
53. White, G.R. NBS Circular 583 (1957).
54. Wyckhoff, H.O. Kennedy, R.J. Bradford, W.R. Nucleon. 3 (5).62 (1948).
55. Wyckhoff, H.O. Kennedy, R.J. Bradford, W.R. J.Res.NBS 41.223 (1948).

Lebenslauf.

Am 26. 10. 1931 wurde ich, Heinrich Georg Ebert, in Dortmund als Sohn des Angestellten Walter Ebert und seiner Ehefrau Sophie, geb. Lehmkühler, geboren. Dort besuchte ich die Volksschule und die Bismarck-Oberschule, bis meine Eltern 1943 nach Herford evakuiert wurden. An dem mathematisch-naturwissenschaftlichen Zweig des dortigen städtischen neusprachlichen Gymnasiums bestand ich 1952 die Reifeprüfung.

Im Sommersemester 1952 wurde ich in Göttingen als Student der Mathematik und Physik immatrikuliert. Im Mai 1954 bestand ich das Diplomvorexamen in Mathematik mit dem Gesamturteil "Gut". Seit 1955 bin ich im Institut für Medizinische Physik und Biophysik der Universität tätig. Ich arbeitete dort an meiner Diplomarbeit und später als studentische Hilfskraft der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Im November 1956 erwarb ich den Grad eines Diplomphysikers mit dem Gesamturteil "Gut".

Seit 1957 bin ich im oben genannten Institut mit der Verwaltung einer wissenschaftlichen Assistentenstelle beauftragt. Ich beabsichtige im Laufe des Jahtes 1960 in Göttingen zu promovieren.